

# Anwendungsaufsatz

## Alarmbehandlung mittels wissensbasierter Intervallanalyse

Alarm handling using knowledge-based interval analysis

Th. Sticher und H. Tolle, Darmstadt

*Es wird ein wissensbasiertes CAFD-System (computer assisted fault diagnosis) vorgestellt, das sowohl die qualitativen heuristischen Erfahrungen der Bediennemannschaft als auch vertieftes mathematisches Wissen zu einer gemeinsamen, sich ergänzenden Prozeßanalyse nutzt. Neben der Einbeziehung eines regelbasierten Moduls wird als wesentliches modellbasiertes Hilfsmittel die Vorgehensweise mittels einer Intervallanalyse und die Struktur ihrer Wissensbasis dargelegt.*

*A knowledge-based CAFD system (computer assisted fault diagnosis) is presented, which utilizes the qualitative heuristic experience of the operating crew as well as deep mathematical knowledge for a common process analysis supplementing each other. Besides the inclusion of a rule-based modul as an essential model-based tool the procedure using an interval analysis and the structure of the knowledge-base is described.*

### 1. Einführende Übersicht

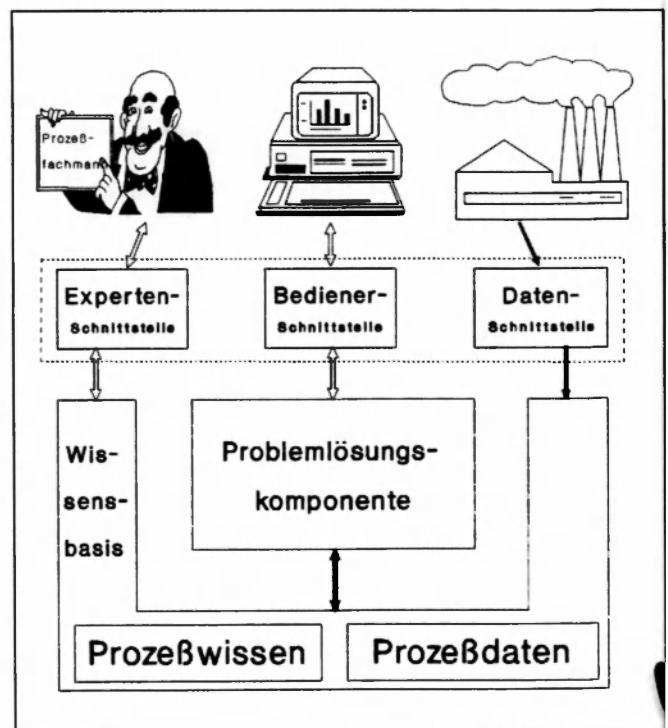
Mit wachsender Komplexität technischer Prozesse wird die Überwachung der Produktionsabläufe und der dabei erzielten Produktqualitäten ein immer wichtigerer Aspekt der Automatisierung. Besonders zur Fehlerdiagnose und Alarmbehandlung verspricht der Einsatz von wissensbasierten Systemen eine neue Qualität. Zur Ergänzung der bisher vornehmlich regelbasierten Diagnosesysteme wird die Nützlichkeit eines zusätzlichen, modellgestützten Moduls zu einer gemeinsamen, sich ergänzenden Prozeßanalyse begründet und eine entsprechende hybride Systemarchitektur vorgestellt. Aus dem Wunsch nach einer einheitlichen Darstellung und Verarbeitung von Modellen unterschiedlicher Genauigkeit entsteht eine modellgestützte Fehlererkennung auf der Basis der Intervallrechnung. Darin ist der Prozeß durch eine hierarchische Darstellung der Komponenten repräsentiert. Jede Komponente wird durch eine Anzahl von funktionalen Zusammenhängen beschrieben, für die als einzige Randbedingung eine intervallmäßige Auswertbarkeit existieren muß. Damit kann eine große Bandbreite von Prozeßkenntnissen formalisiert und einer automatischen Prozeßüberwachung verfügbar gemacht werden. Dieser Aufsatz zeigt die Vorgehensweise der Intervallanalyse und geht auf die Struktur der Wissensbasis aus der Sicht eines Prozeß-Experten ein.

### 2. Überwachung technischer Prozesse

Die Überwachung der Produktionsabläufe und der dabei erzielten Produktqualitäten erfolgt bisher hauptsächlich durch Grenzwertüberwachung der Meßsignale mit nachfolgenden Alarmmeldungen und Schutzmaßnahmen. Durch die isolierte Betrachtung der einzelnen Signale werden auftretende Fehler jedoch häufig erst sehr spät erkannt, so daß eine aufmerksame und erfahrene Bedienungsmannschaft notwendig ist, um diese Mängel mit Hilfe der menschlichen Sensorik auszugleichen.

Durch die fortschreitende Rechnerentwicklung und die verbreitete Nutzung von Prozeßleitsystemen sind jedoch mittlerweile die apparativen Voraussetzungen geschaffen, um komplexe Algorithmen zur Fehlererkennung zu entwickeln und billig einzusetzen.

Konventionelle Programmiermethoden führen dabei häufig zu individuellen Speziallösungen, die selbst auf ähnliche Anlagen nur schwer übertragbar sind bzw. bereits bei kleinen Änderungen im Prozeßaufbau einen erheblichen Aufwand zur Anpassung der Software verursa-



**Bild 1.** Standardarchitektur eines wissensbasierten Systems zur Fehlerdiagnose.

chen. Der Einsatz von wissensbasierten Techniken bietet durch die Trennung des speziellen Wissens über den Prozeß (Wissensbasis) von dem algorithmischen Lösungsweg (Problemlösungskomponente) einen Ausweg, weil jeder Teil unter Einhaltung der durch die Schnittstelle gegebenen Randbedingungen unabhängig veränderbar ist.

Wenn man die bewährte Meßwerterfassung und -aufbereitung durch das Prozeßleitsystem mit nutzt, entsteht für ein System zur wissensbasierten Alarmbehandlung die im Bild 1 gezeigte prinzipielle Struktur. Die vom Prozeßleitsystem in die Datenbasis übermittelten Meßdaten werden durch die Problemlösungskomponente mit Hilfe der Wissensbasis ständig analysiert, auftretende Zustände klassifiziert und gegebenenfalls wird über außergewöhnliche Situationen informiert in Verbindung mit der Angabe der zu treffenden Maßnahmen. Die Wissensbasis enthält die dazu notwendigen prozeßspezifischen Kenntnisse, die von einem Fachmann interaktiv einzubringen sind.

### 3. Methoden wissensbasierter Fehlerdiagnose

Von entscheidender Bedeutung für die Fähigkeiten eines solchen Systems ist die Darstellung des Prozeßwissens (Wissensrepräsentation) und damit verbunden die Methode zur Verknüpfung des Wissens mit den aktuellen Daten in Richtung auf eine Beurteilung des aktuellen Prozeßzustands (Inferenzmechanismus). Für eine leistungsfähige Alarmerkennung und -behandlung ist es wünschenswert, möglichst viele Kenntnisse über den betrachteten Prozeß zu nutzen. Diese Kenntnisse liegen im allgemeinen auf sehr unterschiedlichen Ebenen vor und reichen von detaillierten mathematischen Modellen des Verhaltens über vage Vorstellungen der möglichen Zusammenhänge bis hin zur Beschreibung von Alarmsituationen durch Erfahrungswerte aus häufig auftretenden Ausfällen. Ideal wäre es deshalb, alle Informationen in der dem jeweiligen Kenntnisstand entsprechenden Form in ein einheitliches Konzept zu integrieren und damit der Diagnose verfügbar zu machen.

#### a) Regelbasierte Diagnose

Die meisten der im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium oder bereits in Betrieb befindlichen Diagnose-Expertensysteme basieren auf der Formulierung von Regeln, die die Gültigkeit von Aussagen (Konklusionen) an die Erfüllung bestimmter Bedingungen (Prämissen) knüpfen [1 bis 4].

Es ist relativ einfach, diese sogenannten Produktionsregeln zur Darstellung von unsicherem oder unvollständigem Wissen um Signifikanzangaben zu erweitern [5]. Damit eignen sich diese besonders gut zur Formulierung von Erfahrungswissen (heuristischem Wissen), das häufig nur diffus erkannte und schlecht strukturierte Problemlösungen umfaßt. Obwohl die Wissensbasis eines solchen Diagnose-Expertensystems oft mehrere hundert Regeln beinhaltet, können aufgrund der effizienten Suchalgorithmen im Inferenzmechanismus mittlerweile befriedigende Ant-

wortzeiten erreicht werden. Wenn jedoch an verschiedenen Stellen unsichere oder unvollständige Prozeßbeschreibungen vorliegen, wird die Diagnose dort nicht so exakt sein können, wie man sich dies erwünscht.

#### b) Modellbasierte Diagnose

In der technischen Fehlerdiagnose finden deshalb auch verschiedene modellbasierte Verfahren Verwendung, deren gemeinsames Ziel es ist, mit mathematischen Werkzeugen zu einer möglichst aussagekräftigen Beurteilung des Prozeßzustands zu gelangen. Neben dem schon klassischen Kalman-Filter und den modernen Parameterschätzverfahren [4], in denen die Koeffizienten einer bekannten Prozeßmodellstruktur identifiziert und bewertet werden, findet im Bereich wissensbasierter Systeme besonders das „Qualitative Schließen“ [6 bis 9] erhöhte Aufmerksamkeit.

Dieses Verfahren beruht auf der Idee, die oft komplizierten analytischen Prozeßmodelle so vereinfachend darzustellen, daß zwar alle wesentlichen Eigenschaften des Prozeßverhaltens beschrieben werden, jedoch ohne die klassische Mathematik der Differentialgleichungen mit ihren stetig veränderlichen Variablen zu benutzen. Dies wird durch die Beschränkung einerseits der Wertemenge auf eine endliche Zahl von Intervallen (z. B. in  $\{-, 0, +\}$ ) und andererseits der Operatoren auf einige wesentliche Grundfunktionen (z. B. Grundrechenarten, Ableitung) erreicht. Umgekehrt bietet diese Betrachtungsweise aber auch die Chance, Prozesse z. B. aus der chemischen Industrie oder der Verfahrenstechnik, die mit begrenztem Aufwand nur qualitativ zu beschreiben sind, einer automatisierten Diagnose zu erschließen.

Wesentlicher Nachteil jeder wissensbasiert modellorientierten Diagnose ist die gegenüber regelbasierten Systemen deutlich höhere Rechenzeit. Wünschenswert wäre es deshalb, die spezifischen Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden in einem hybriden (gemischten) System so zu berücksichtigen, daß ein tragbarer Kompromiß zwischen Zeitbedarf und Güte einer Diagnose erreicht wird.

#### c) Ein hybrides Diagnoseverfahren

Die schnellste Antwort bei oft ausreichender Genauigkeit erzielen zweifellos die regelbasierten Systeme. Es bietet sich also an, ein solches zur Grundlage der Diagnose zu erheben. Dann muß ein modellbasiertes Verfahren nur eingreifen, wenn die Regeln kein befriedigendes Ergebnis erzielen. Auch dann kann man jedoch erwarten, daß ein Zwischenergebnis zumindest einen oder einige verdächtige Prozeßteile isoliert hat, so daß dann nicht mehr der ganze Prozeß detailliert zu betrachten ist, sondern auf eine Untermenge fokussiert wird, was schon zu einer bedeutenden Verbesserung gegenüber einer rein modellorientierten Diagnose führen kann.

Als Ausgangspunkt zur Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge im Prozeßablauf in beliebiger (Un-) Genauigkeit dient die mathematische Disziplin der Inter-

vallrechnung [10;11], die die Eigenschaften von Verknüpfungen reeller Intervalle der Form

$$A = [a_1, a_2] = \{x | a_1 \leq x \leq a_2; a_1, a_2 \in \mathbb{R}\} \quad (1)$$

betrachtet. Sowohl die klassische Mathematik als auch die bereits angesprochenen qualitativen Ansätze können als Sonderfälle der Intervallmathematik aufgefaßt werden, so daß dementsprechende Kenntnisse genauso wie z. B. Wertebereiche von Koeffizienten des in seiner Struktur bekannten Modells oder näherungsweise vorliegende Zusammenhänge zwischen verschiedenen Meßwerten oder Toleranzzonen für einzelne Meßgrößen zur Alarmgebung in einer einheitlichen Weise formuliert und während der Diagnose analysiert werden können.

Damit ergibt sich insgesamt die im Bild 2 gezeigte Struktur einer hybriden wissensbasierten Alarmbehandlung. Wesentlich ist die Aufteilung des Systemkerns in zwei weitgehend autonome Module, die einerseits regelbasiert und andererseits mit Hilfe der Intervallanalyse den aktuellen Prozeßzustand beurteilen können.

Der Ablauf der Diagnose erfolgt dann entsprechend dem im Bild 3 skizzierten Vorgehen. Nach der Übertragung der aktuellen Prozeßdaten werden zunächst Standarduntersuchungen vorgenommen, die z. B. aus der unmittelbaren Überprüfung besonders (zeit-)kritischer Ausfälle bestehen. Anschließend wird zum regelbasierten Modul verzweigt, dessen Hypothesen- und Test-Strategie sich in der Diagnose als zweckmäßig bewährt hat [2]. Dabei werden in einem ersten Schritt aus den gegebenen Symptomen (Meßdaten) Verdachtshypothesen aufgestellt, die dann gezielt mit Hilfe aller zur Verfügung stehenden Informationen überprüft werden. In einem rein regelbasierten Sy-

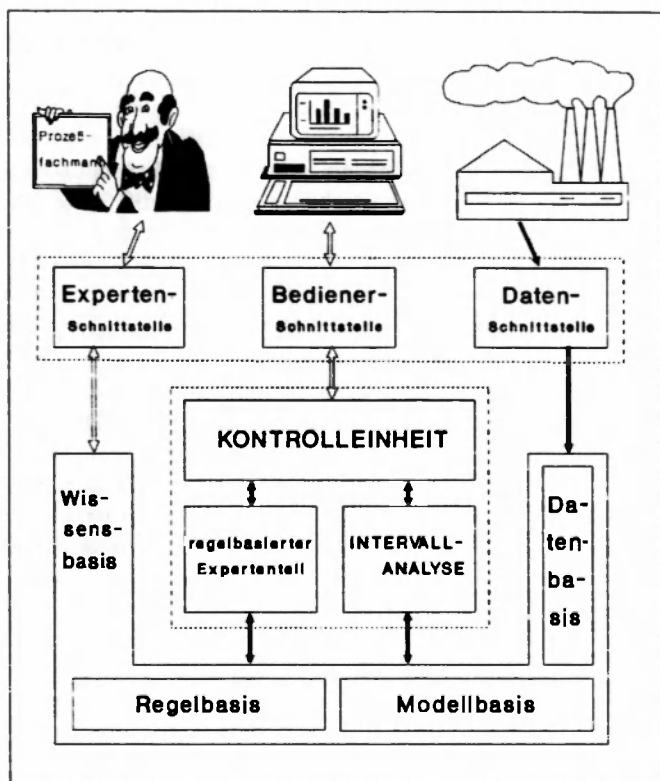


Bild 2. Architektur des hybriden wissensbasierten Systems zur technischen Fehlerdiagnose.

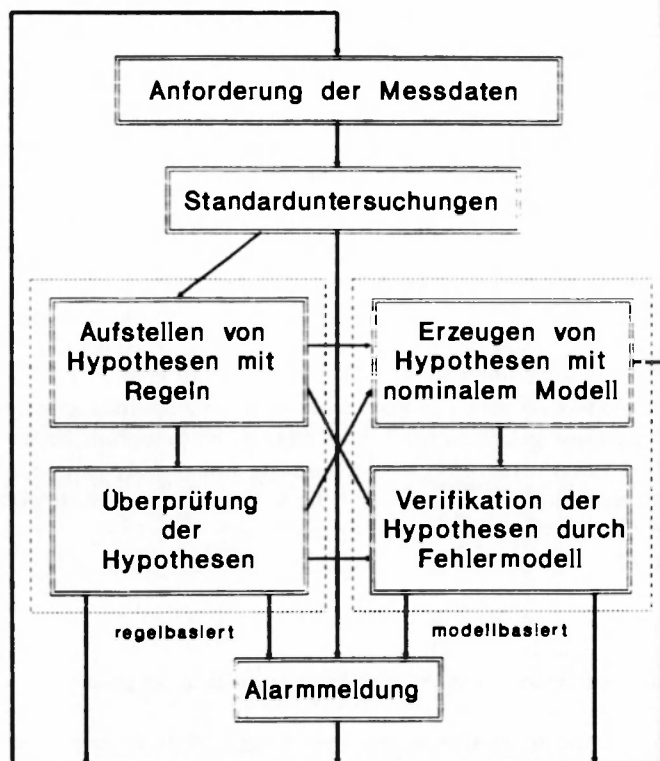


Bild 3. Ablauf der Diagnose während eines Abtastschritts.

stem wird der 2. Schritt mit entsprechenden zusätzlichen Regeln zur Rückwärtsverkettung durchgeführt. Das hybride System gestattet aber außerdem die modellbasierte Überprüfung durch die Intervallanalyse.

#### 4. Diagnose durch Intervallanalyse

Die modellbasierte Analyse der dynamischen Vorgänge eines komplexen technischen Prozesses erfordert naturgemäß einen erheblichen Rechenaufwand, insbesondere wenn in jedem Abtastschritt alle verfügbaren Informationen zur Diagnose genutzt werden, das heißt jede Prozeßkomponente so detailliert wie möglich auf potentielle Fehler hin untersucht wird. In Anlehnung an die gegebene Prozeßstruktur ist deshalb eine hierarchische Prozeßbeschreibung vorgesehen, so daß ausgehend von einer groben globalen Beschreibung des Gesamtsystems einzelne Komponenten und Unterkomponenten immer genauer betrachtet werden können. Die Diagnose kann sich so zunächst einen schnellen Überblick verschaffen und anschließend ihre Untersuchungen gezielt vertiefen. Darüber hinaus bietet sich die Möglichkeit, in jeder beliebigen Ebene zur Analyse einzusteigen, so daß mit regelbasiert aufgestellten Hypothesen direkt ein bestimmter Prozeßteil angesprochen werden kann.

Damit zerfällt die wissensbasierte Bearbeitung des so strukturierten Prozeßwissens in zwei unterschiedliche Problemstellungen, die weitgehend getrennt behandelt werden können:

- Auswahl der zu betrachtenden Prozeßkomponente innerhalb der gegebenen Hierarchie,
- Auswertung der gewählten Komponente mit Hilfe der Intervallanalyse.

### a) Auswahl der zu analysierenden Prozeßkomponente

Aufgabe dieser Phase ist die Erstellung einer geordneten Liste von Prozeßkomponenten, die in der vorgegebenen Reihenfolge durch die Intervallanalyse zu betrachten sind. Initialisiert wird diese Agenda entweder durch das von der regelbasierten Stufe erarbeitete Zwischenergebnis oder, wenn keines vorliegt, mit einer Komponente, die den Prozeß in seiner obersten Ebene beschreibt. Die Untersuchung weiterer Komponenten ist dann von den Ergebnissen der Intervallanalyse der vorgegebenen Komponenten abhängig. Dabei kann zunächst nur entschieden werden, ob eine vertiefende Betrachtung notwendig ist oder nicht. Um die Analyse aller Unterkomponenten zu vermeiden, ist es durch zusätzlich in der Wissensbasis abgelegte Fehlerbeschreibungen möglich, einen Teil der nominalen Funktionen der Komponente zu ersetzen und eine erneute Propagierung vorzunehmen mit dem Ziel, das beobachtete Prozeßverhalten mit einem der vorhandenen Fehlermodelle in Übereinstimmung zu bringen. Als Konsequenz dieses Schrittes kann entweder der Fehler sogar direkt bezeichnet werden oder es können gezielte Hinweise auf die zu untersuchenden Unterkomponenten gegeben werden.

### b) Analyse einer Prozeßkomponente

Eine Prozeßkomponente ist durch eine Menge von funktionalen Zusammenhängen (Constraints) in der Form

$$\begin{aligned} f_{ij}(x(t), \dot{x}(t), m(t), \dot{m}(t), t) &= \\ &= f_{rj}(x(t), \dot{x}(t), m(t), \dot{m}(t), t), \\ j &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

bzw. in einem abgetasteten System durch

$$\begin{aligned} f_{ij}(x(k), x(k-1), m(k), m(k-1), k) &= \\ &= f_{rj}(x(k), x(k-1), m(k), m(k-1), k), \\ j &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

beschrieben. Die beteiligten Funktionen  $f_{ij}$  und  $f_{rj}$  können dabei beliebig nichtlinear und mit Nebenbedingungen behaftet sein (der Wissensbasis steht der gesamte Sprachumfang von LISP zur Verfügung), sofern nur als Ergebnis ein Intervall entsteht. Aufgabe der Komponentenanalyse ist es nun, diese Beschreibung mit Hilfe der  $p$  verfügbaren Meßwerte  $m$  zu verifizieren oder Widersprüche aufzudecken, die eine Veränderung des angenommenen Modells vermuten lassen. Dazu sind auch  $q$  nicht-meßbare (Hilfs-)Variablen  $x$  verwendbar. Grundlage der Komponentenanalyse bilden somit  $n$  (linear unabhängige) Funktionen mit  $q$  Unbekannten gemäß Gl. (3), die bei normalem Prozeßverlauf gültig sind und damit einzuhaltende Randbedingungen darstellen.

Bei technischen Systemen ist es oft möglich, mit

$$\bar{x}_i = (x_1 \dots x_{i-1}, 0, x_{i+1} \dots x_q)^T \quad (4)$$

die mathematische Beschreibung explizit nach mehreren Variablen

$$\begin{aligned} x_i(k) &= g_{ij}(x_i(k), x(k-1), m(k), k), \\ i &= 1, \dots, q, \quad j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

aufzulösen. Ziel der Analyse ist es nun, mit der Einschränkung der Variablenintervalle auf der Basis der Meßwerte durch die Auswertung der in der Off-line-Phase des Diagnosesystems zusätzlich berechneten maximal  $n \cdot q$  Funktionen nach Gl. (5) die Konsistenz der Beschreibung zu überprüfen.

Vom Einsatz eines der gebräuchlichen, auch für intervallmäßige Gleichungssysteme verwendbaren Iterationsverfahren [10] wurde abgesehen, weil einerseits nicht für alle  $x_i$  die Existenz einer Gleichung nach Gl. (5) garantiert werden kann, andererseits aber auch mehrere Funktionen  $g_{ij}$  für ein  $x_i$  existieren können, was zusätzliche Auswahlkriterien erfordert, und zudem das System unter- oder überbestimmt sein kann, so daß insgesamt eine wissensbasierte Auswertung sinnvoll ist.

Unsere Analyse teilt die Funktionen zunächst in drei Gruppen ein:

- Funktionen ohne unbekannte Variablen,
  - Funktionen mit genau einer unbekannten Variablen  $x_i$ ,
  - Funktionen mit mehr als einer unbekannten Variablen.
- Dementsprechend werden die Funktionen unterschiedlich bearbeitet.

#### $\alpha$ ) Funktionen ohne unbekannte Variablen

Diese müssen im fehlerfreien Prozeßzustand – bei korrekter Modellbildung – eine wahre Aussage darstellen. Durch die recht unterschiedlichen Modellgenauigkeiten der Funktionen ist jedoch keine scharfe Trennung zwischen wahr und falsch möglich, so daß zur Beurteilung des Grades der Übereinstimmung von Daten und Modell ein Signifikanzfaktor einzuführen ist, der dann Aussagen über die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls erlaubt. Grundlage dieser Bewertung ist die intervallmäßige Berechnung der entsprechenden Funktionen  $f_{ij}$  und  $f_{rj}$  aus Gl. (3) mit einem Vergleich der beiden resultierenden Intervalle  $A_j = [a_{1j}, a_{2j}]$  und  $B_j = [b_{1j}, b_{2j}]$ . Dafür wäre die Verwendung des von den Mathematikern definierten Abstands zweier Intervalle in einer normierten Variante (wegen der Konsistenz mit dem im regelbasierten Teil verwendeten „Mycin-Faktor“) naheliegend. Unglücklicherweise haben jedoch auch Intervalle mit gleichem Mittelwert, aber unterschiedlicher Länge einen von Null verschiedenen Abstand. Bei der Diagnose mit variierenden Modellgenauigkeiten darf daraus aber nicht unmittelbar auf einen Fehler geschlossen werden, so daß eine eigene Bewertungsfunktion erarbeitet wurde, die diesen Sonderfall berücksichtigt:

$$\begin{aligned} c_j(A_j, B_j) &= \frac{|a_{1j} + a_{2j} - b_{1j} - b_{2j}|}{\max(a_{2j} - b_{1j}, b_{2j} - a_{1j})}, \\ j &= 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

Diese Funktion gewährleistet insbesondere, daß  $c_j = 0$  ist, wenn der Mittelwert von  $A$  und  $B$  übereinstimmen,



und  $c_j > 1$  ist, wenn  $A$  und  $B$  divergent sind. Schnittmengen werden nach dem Grad der Überlappung und der Abweichung des Mittelwerts mit  $0 < c_j < 1$  bewertet. Die Signifikanz eines Fehlers innerhalb der untersuchten Komponente ergibt sich dann aus

$$c_f = \max(c_1, c_2 \dots c_n), \quad (7)$$

wobei  $c_j = 0$  ist, solange die entsprechende Funktion noch nicht auswertbar ist.

#### *β) Funktionen mit genau einer unbekannten Variablen $x_i$*

Mit einer Funktion dieser Gruppe ist die Berechnung der entsprechenden Variablen  $x_i$  nach Gl. (5) möglich (einfache Constraint-Propagierung). Danach wird diese Funktion der Gruppe 1 zugeordnet und die Funktionen der Gruppen 2 und 3 neu klassifiziert, wobei es besonders interessant ist, wenn dabei eine Funktion in Gruppe 1 aufgenommen wird. Sie ist ohne Unbekannte, aber noch nicht ausgewertet, so daß neben einer Bewertung nach Unterabschnitt  $\alpha$  unter Umständen die Intervalle der anderen in der Funktion enthaltenen Variablen zu verkleinern sind, indem sie mit der neu hinzugekommenen Randbedingung abgeglichen werden. Jeder Veränderung eines Variablenintervalls folgt dann die erneute Prüfung aller Funktionen der Gruppe 1, die eine der verbesserten Variablen verwenden, weil so unter Umständen weitere Variablen eingegrenzt werden können. Damit entsteht eine Iterationsvorschrift, die genau dann eingreift, wenn die Aussicht auf Erfolg besteht.

#### *γ) Funktionen mit mehr als einer unbekannten Variablen*

Diese Gruppe muß erst näher betrachtet werden, wenn in den Gruppen 1 und 2 keine weiteren Propagierungen mehr durchführbar sind. Da aufgrund der im allgemeinen unendlichen Wertemenge der Variablen durch einfache Fallunterscheidungen kein Lösungsweg in Aussicht ist, können dann nur noch iterative Verfahren oder eine aufwendige symbolische Constraint-Propagierung, die die Fähigkeit zu algebraischen Umformungen voraussetzt, um damit die fehlenden Variablen systematisch zu berechnen, weitere Fortschritte erhoffen lassen. Aus Aufwandsgründen wurde darauf bisher verzichtet, so daß die Wissensbasis statt mit einer komplexen Funktion möglichst mit mehreren einfacheren Funktionen zu versehen ist.

## 5. Wissensbasis der Intervallanalyse

Für den Prozeßfachmann und Nicht-Informatiker ist besonders die Gestaltung der Wissensbasis von Interesse, da er in der Lage sein soll, diese zu verstehen und zu bearbeiten. Die Intervallanalyse arbeitet mit einer objektorientierten Wissensrepräsentation in Anlehnung an die in [12] vorgestellte FRL (Frame Representation Language) und nutzt somit zu einer ökonomischen Datenhaltung die Vorteile der Vererbungsmechanismen durch das Referenzieren auf in anderen Frames enthaltene Informationen. Die folgenden Abschnitte zeigen die wichtigsten Aspekte der Wissensstrukturierung auf.

### *a) Die Funktionsbibliothek*

Eine Bibliothek von symbolischen Funktionsbeschreibungen, in der verschiedene Prozeßkomponenten in allgemeiner Form erfaßt sind, erleichtert die Erstellung einer Wissensbasis wesentlich, weil vergleichbare Komponenten nur einmal explizit durch das gemeinsame physikalische Verhalten als Prototyp zu beschreiben sind und später bei der Eingabe der Prozeßstruktur auf diese allgemeinen Kenntnisse zurückgegriffen werden kann.

### *b) Beschreibung von Komponenten*

Zentrales Element der Prozeßbeschreibung ist die Komponente, in der gemäß Bild 4 alle Informationen zur Intervallanalyse zusammengefaßt sind. Die mit „attach-“ eingeleiteten Eigenschaften dienen zur Herstellung der Verbindungen zwischen den im Prototyp verwendeten Symbolen und den zur Intervallanalyse gewählten Namen der Meßwerte, Variablen und Konstanten. Diese zulässigen Symboltypen werden im Bild 5 beschrieben und unter-

Eigenschaft	Beschreibung
prototyp <sup>1,2)</sup>	Name des Prototyps mit den symbolischen Beschreibungen
superclass <sup>1,2)</sup>	Übergeordnete Komponente in der Prozeßhierarchie
subclasses <sup>1,2)</sup>	Untergeordnete Komponenten in der Prozeßhierarchie
functions <sup>3)</sup>	Liste der Funktionsframes
attach-parameters <sup>1)</sup>	Zusammenhang der Symbole aus PROTOTYP mit den Meßwerten und Variablen der realen Prozeßkomponente
attach-constants <sup>1)</sup>	Zusammenhang der Symbole aus PROTOTYP mit den Konstanten der realen Prozeßkomponente

<sup>1)</sup> Muß in jedem Fall angegeben werden.

<sup>2)</sup> Kann optional verwendet werden.

<sup>3)</sup> Kann editiert werden, wird vom System ergänzt.

**Bild 4.** Definition des Frames KOMPONENT.

Eigenschaft	Beschreibung
my-value <sup>1)</sup>	Numerischer Wert, falls existent
unit <sup>2)</sup>	Physikalische Einheit des Werts
range <sup>3)</sup>	Meßbereich
symbol <sup>1)</sup>	Symbolische Umsetzung des Werts
:all-possible <sup>3)</sup>	Liste der zulässigen Symbole
trend <sup>1)</sup>	Tendenz der Wertveränderung
measurement-error <sup>3)</sup>	Meßfehler (absolut oder relativ)
interval <sup>1)</sup>	Aktuelles Intervall
history <sup>1)</sup>	Speicherung vergangener Intervalle

<sup>1)</sup> Wird vom System ständig aktualisiert.

<sup>2)</sup> Kann optional verwendet werden.

<sup>3)</sup> Muß bei Meßwerten immer angegeben werden.

**Bild 5.** Definition des Frames für die Symboltypen MEASUREMENT, VARIABLE und CONSTANT.

scheiden sich im wesentlichen durch die unterschiedlichen Zugriffsrechte auf die enthaltenen Daten:

- Meßwerte werden von der Meßwernerfassung beschrieben und dürfen sonst nur gelesen werden.
- Variablen dürfen von der Intervallanalyse beschrieben und gelesen werden.
- Konstanten dürfen nur gelesen werden.

c) Darstellung der Funktionen

Entsprechend Gl. (3) werden die beiden Seiten der Funktion separat abgelegt. Außer den Bild 6 zu entnehmenden Eigenschaften ist die Tatsache erwähnenswert, daß die symbolischen Auflösungen nach Gl. (5) im allgemeinen automatisch durchgeführt werden und in separaten Hilfsfunktionen abgelegt werden. Nur nichtalgebraische Zusammenhänge, bei denen eine automatische Auflösung unmöglich ist, müssen – wenn verfügbar – manuell eingegeben werden.

Eigenschaft	Beschreibung
left-side	Linke Seite der funktionalen Beschreibung
right-side	Rechte Seite der funktionalen Beschreibung
possible-solutions <sup>1)</sup>	Variablen, nach denen eine Auflösung zulässig ist
subequations <sup>1)</sup>	Liste der Unterframes
a-kind-of <sup>2)</sup>	Name des Hauptframes
parameters <sup>3)</sup>	Liste der Meßwerte und Variablen
constants <sup>3)</sup>	Liste der Konstanten
is-used-by	Name der Komponente, die diese Gleichung nutzt

<sup>1)</sup> Nur bei Hauptfunktion zulässig.  
<sup>2)</sup> Nur in Hilfsfunktionen sinnvoll.  
<sup>3)</sup> Nur bei Typ FUNCTION notwendig.

Bild 6. Definition der Frames FUNCTION und SYMBOLIC-FUNCTION.

d) Die Fehlerbeschreibungen

Fehlerbeschreibungen beinhalten neben den textuellen Angaben zur Alarmmeldung und dem Maßnahmenkatalog entsprechend Bild 7 insbesondere die Möglichkeit, das von der nominellen Beschreibung abweichende Fehlverhalten in eigenen Funktionen vorrätig zu halten, damit bei gegebenen Verdachtsmomenten eine Verifikation durchführbar ist.

Eigenschaft	Beschreibung
my-name	Text zur Fehlerbezeichnung
description	Text für Beschreibung und Maßnahmenliste
is-used-by	Name der Komponente, in der der Fehler auftritt
alt-functions	Beschreibung des fehlerhaften Verhaltens

Bild 7. Definition des Frametyps FAULT-DESCRIPTION.

6. Ein Beispiel zur Intervallanalyse

Für die praktischen Versuche einer Intervallanalyse werden derzeit die in [13] durchgeführten Identifikationen zur Fehlerdiagnose an einer elektrisch angetriebenen Kreiselpumpe (Bild 8) genutzt, weil die dabei gewonnenen Daten sowohl zur Erstellung der Wissensbasis durch die Beschreibung der nominalen und fehlerhaften Verhaltensweisen als auch zu einer in der Entwicklungsphase bedeutsamen gefahrlosen Simulation beliebiger (fehlerbehafteter) Prozeßabläufe verwendbar sind.

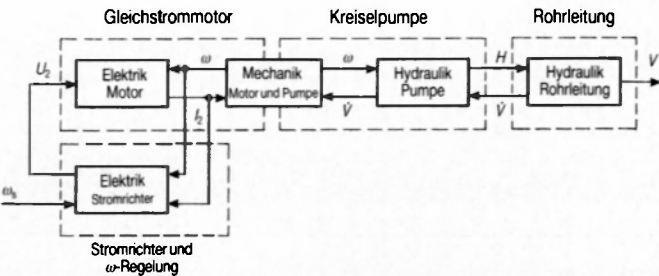


Bild 8. Die Signalverknüpfungen der drehzahlregelten Kreiselpumpe (aus [13] entnommen).

Die Wissensbasis ist aus den Komponenten entsprechend Bild 8 aufgebaut mit einer zusätzlichen obersten Ebene, die den Gesamtprozeß statisch beschreibt und so für den fehlerfreien stationären Betrieb eine ausreichende Beschreibung darstellt, die relativ einfach zu prüfen ist. Erst bei Prozeßschwankungen greift die genauere komponentenweise Untersuchung, deren Funktionen mit den zum Teil abgeleiteten Meßgrößen des Ankerstroms  $I_2(t)$ , der Ankerspannung  $U_2(t)$ , der Kreisfrequenz  $\omega(t)$  und des Volumenstroms  $V(t)$ , sowie den Hilfsvariablen der Rotationsspannung  $U_{rot}(t)$ , den Drehmomenten  $M_Q(t)$  und  $M_w(t)$  und der Förderhöhe  $H(t)$  wie folgt gegeben sind.

Elektrik des Motors:

$$U_2(t) = L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2(t) + U_{rot}(t) , \tag{8}$$

$$U_{rot}(t) = \Psi \omega(t) . \tag{9}$$

Mechanik des Motors und der Pumpe:

$$M_Q(t) = \Psi I_2(t) , \tag{10}$$

$$M_w(t) = M_Q(t) - c_{RM0} - I_M \frac{d\omega}{dt} , \tag{11}$$

$$M_w(t) = I_P \frac{d\omega}{dt} - x_{RP0} + \varrho g h_{TH} \omega(t) \dot{V}(t) . \tag{12}$$

Hydraulik der Pumpe:

$$H(t) = h_{NN} \omega^2(t) . \tag{13}$$

Hydraulik des Rohrs:

$$H(t) = a_B \frac{d\dot{V}}{dt} + h_{RR} \dot{V}(t) . \tag{14}$$

Alle auftretenden Konstanten werden als Intervalle repräsentiert, deren Grenzen durch die in [13] identifizierten Werte mit den dort angegebenen Unsicherheiten bestimmt sind.

Zunächst zeigt Bild 9 den Ablauf einer Intervallanalyse in einer fehlerfreien Situation mit der Untersuchung aller Unterkomponenten, wobei nur die Stationen aufgezeigt sind, die tatsächlich zu einer Veränderung von Variablen geführt haben.

Nr.	Komp.	Gl.	Variable	Neues Intervall
0	Meßwert	-	$I_2$	[ 3,15 3,17]
	Meßwert	-	$U_2$	[ 104,50 108,50]
	Meßwert	-	$\omega$	[ 104,59 105,64]
	Meßwert	-	$V$	[ 0,0017 0,0021]
1	- <sup>1)</sup>	-	$dI_2/dt$	[ -4,00 4,00]
2	Motor	(8)	$U_{rot}$	[ 96,98 102,10]
3	- <sup>1)</sup>	-	$d\omega/dt$	[ -20,94 20,94]
4	Motor	(9)	$U_{rot}$	[ 98,00 101,09]
5	Motor	(10)	$M_0$	[ 2,87 3,12]
6	Motor	(11)	$M_W$	[ 2,25 3,04]
7	- <sup>1)</sup>	-	$dV/dt$	[ -0,0081 0,0081]
8	Pumpe	(13)	$H$	[ 5,01 5,20]
9	Rohr	(14)	$dV/dt$	[ -0,0027 0,0024]

<sup>1)</sup> Berechnung der Trends aus der Variablenhistorie.

**Bild 9.** Die Intervallanalyse im Gutzustand führt zur Berechnung und schrittweisen Verbesserung von Variablenintervallen.

Bild 10 beschreibt dann die Analyse, wenn die Meßwerte durch einen erhöhten Ankerwiderstand verändert sind. Hier taucht nach kurzer Zeit zwischen den Schritten 2 und 4 in der Berechnung der Rotationsspannung ein eindeutiger Widerspruch auf, der durch das veränderte Verhalten verursacht wird. Damit ist aber zunächst nur die Existenz einer Alarmsituation erkannt. Erst ein die Ursache berücksichtigendes, also den Fehler einschließendes Modell, das zu einem Bild 9 analogen Ablauf führt, kann den genauen Fehler verifizieren.

Nr.	Komp.	Gl.	Variable	Neues Intervall
0	Meßwert	-	$I_2$	[ 2,26 2,28]
	Meßwert	-	$U_2$	[ 104,50 108,50]
	Meßwert	-	$\omega$	[ 100,99 102,04]
	Meßwert	-	$V$	[ 0,0016 0,0020]
1	- <sup>1)</sup>	-	$dI_2/dt$	[ -8,31 -0,31]
2	Motor	(8)	$U_{rot}$	[ 99,24 104,32]
3	- <sup>1)</sup>	-	$d\omega/dt$	[ -71,41 -29,52]
4	Motor	(9)	$U_{rot}$	[ 94,63 97,65]

<sup>1)</sup> Berechnung der Trends aus der Variablenhistorie.

**Bild 10.** Die Alarmerkennung bei erhöhtem Ankerwiderstand ergibt einen Widerspruch zwischen den Schritten 2 und 4 und zeigt damit die Existenz eines Fehlers.

7. Schlußbemerkungen

Fragen der Echtzeitanbindung wurden bisher nicht intensiv betrachtet, weil zunächst die grundsätzliche Eignung der Methode der Intervallanalyse für eine Fehlerdiagnose untersucht werden sollte.

Die von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) geförderten laufenden Arbeiten beschäftigen sich zur Zeit schwerpunktmäßig mit der Verknüpfung der beiden Diagnosemodule (regelbasiert und modellbasiert) im Blick sowohl auf eine effiziente gemeinsame Arbeitsweise als auch der Konsistenz der beteiligten Wissensbasen.

Die erreichten Ergebnisse werden mit der Fehlerdiagnose mittels Parameterschätzung [13] und einem an der TH Darmstadt laufenden Forschungsvorhaben zu einer regelbasierten Störungsablaufanalyse in Energieversorgungsnetzen bezüglich ihrer Aussage- und Leistungsfähigkeit verglichen, um Vor- und Nachteile des hier vorgestellten Ansatzes herausarbeiten zu können.

Literatur

[1] *Puppe, F.*: Einführung in Expertensysteme. Studienreihe Informatik, Springer-Verlag, Berlin 1988.

[2] *Puppe, F.*: Assoziatives diagnostisches Problemlösen mit dem Expertensystemshell MED2. Dissertation, Universität Kaiserslautern 1986.

[3] *Ahrens, W.*: Einsatz von Expertensystemen in der Prozeßbleittechnik. Automatisierungstechnische Praxis 29 (1987), S. 475-485.

[4] *Isermann, R.*: Wissensbasierte Fehlerdiagnose technischer Prozesse. Automatisierungstechnik 27 (1988), S. 421-426.

[5] *Buchanan, B. G., und Shortliffe, E. H.*: Rule-Based Expert Systems. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1984.

[6] *de Kleer, J., und Brown, J. S.*: A Qualitative Physics Based on Confluences. Artificial Intelligence 24 (1984), S. 7-83.

[7] *Forbus, K. D.*: Qualitative Process Theory. Artificial Intelligence 24 (1984), S. 85-168.

[8] *Kuipers, B.*: The Limits of Qualitative Simulation. Proceedings of 9th International Conference on AI, 1985, S. 128-136.

[9] *Früchtenicht, H. W. u. a.*: Technische Expertensysteme: Wissensrepräsentation und Schlußfolgerungsverfahren. Oldenbourg Verlag, München 1988.

[10] *Alefeld, G., und Herzberger, J.*: Einführung in die Intervallrechnung. Bibliographisches Institut, Zürich 1974.

[11] *Moore, R. E.*: Interval Analysis. Verlag: Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1966.

[12] *Roberts, B., und Goldstein, I.*: The FRL Primer. Memo 408, Artificial Intelligence Laboratory, MIT, Cambridge, MA, 1977.

[13] *Geiger, G.*: Technische Fehlerdiagnose mittels Parameterschätzung und Fehlerklassifikation am Beispiel einer elektrisch angetriebenen Kreislumpumpe. VDI-Verlag, Reihe 8, Nr. 91. Düsseldorf 1985.

Manuskripteingang: 31. August 1989.

Dipl.-Ing. Th. Sticher und Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. H. Tolle, Technische Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Regelsystemtheorie und Robotik, Schloßgraben 1, D-6100 Darmstadt.

Verfügbar unter  
lediglich die vom Gesetz vorgesehenen Nutzungsrechte gemäß UrhG